

# エネルギー恒存の原理の成立（其の二）

坂 本 信 太 郎

一、はじめに

二、永久機関不能の原理

三、静力学に於ける永久機関不能の原理

四、動力学と活力恒存の法則

（以上其の一 目次）

## 五 非力学的现象への適用

（カルノーの理論）

十八世紀は正に蒸気機関の時代であった。この世紀に絢爛と開花した近世資本主義精神——能率をよくすること・経済的にすること・合理化すること・実証的であること・確実なこと——は、同時にガリレオ、ニュートンにより完成された科学的精神と完全に一致するものであり、これらのことがワットをして単なる機械職人とせず、エンジンヤーとし、亦商人・経営者としてのワットを創り出し、「火力機関の蒸気と燃料の消費を軽減せしめる新発明」であ

る蒸気機関を生み出させたのである。そして多数の技術者の努力は愈々それを技術的に完璧なものに仕上げていった。十九世紀に入ると、それは更に交通及び産業に変革的な影響を与えていった。その発展の中には実用的にも科学的にも、最大の興味を呼び起す問題がひそんでいたのであるが、それについての理論はといえばマルクスが言うように、実に貧弱な状態に留っていた。目前で現実には熱機関として熱が仕事に移行することがどんどん進行されているにも拘らず、熱が仕事に変換するという考えは未だ予感としてすら成立していなかったし、いわんやどのようにして熱が仕事に変換するかは全然謎というより外なかった。

この当時には、もう学者達には活力保存の法則が大きな普遍力を有すること、永久機関の組立は、力学的方法によるは勿論のことこれ以外の方法によるも不可能であることが一般的に可成り知られてきていた。しかし長い間誰一人としてこの法則を更に科学のために利用しようとすることに考え及ばないでいた。このような状態の中で最初にこの原理を非力学的な原理に適用したのは、一八二四年「火の動力およびこの力の発生に適当な機械に関する考察」(Réflexions sur la puissance motrice du feu et les machines propres à développer cette puissance.) という論文を発表したフランスのサディ・カルノー (Nicolas Léonard Sadi Carnot, 1796-1832) であった。

どの蒸気機関も使用した燃料量と、する仕事の間には、その機関固有の転換係数があり、この係数は機関の改良と共に増大させることが出来るように思えた。しかし、この係数即ち効率 (Efficiency) は無限に増し得るものであるのか、或いは有限であるのか、若し有限ならばそれはどんな値を持つのであるか等に就いては不分明なままの状態であった。カルノーは次のようにいっている。

「蒸気機関に関してあらゆる努力が傾けられたにもかかわらず、またそれがこんにち満足すべき状態におかれているにもかかわらず、その理論となると遅々として進まず、それを改良しようとする試みも殆んど常に偶然によって支

配されてきた。かくしてしばしば次の問題が起った。それは熱の動力は有限か無限か、改良し得る一定の限界があるかないか、即ち事物の本性に妨げられて、いかなる方法を以てしても超え得ない限界があるかないか、或いは反対に、無限に改良しうるものかどうか？ それからまた、火熱の動力の発生にとって水蒸気にまさる代用物があるかどうか、例えば大気はこの点に於てより多くの長所をもつものかどうか、を人々は長い間さがし求めてきたし、今も探している。われわれは、ここにおいて、これらの問題に慎重なる観察を下すことを自己の任務とする。」と

彼は先づ蒸気機関の効率には限界が存在するに違いない。そうでなければ永久機関が可能なはずだと考え、永久機関不可能の思想から出発して、熱に就いての理論樹立の第一歩を印したのである。次に彼の方法、過程を見ることにしよう。

一般に A・B 二つの現象（この両現象は同一の範疇に属するものであっても、なくてもよい。）があり、A 現象については既に十分にその性質や過程等がよく知られており、更にそれに関する原理や理論が知られているが、B 現象については全く未開拓の領域であって、部分的な過程、性質が多少知られている程度であるとする。このとき B 現象についての理論・法則を樹立する際、その手掛りのために学者達がよく使用する方法として類推的思考法（Analogical Method）がある。

論理的思考能力の発生の前段階にあるとされているこの思考法は、一定の限度内で、あれこれの対象の、まだ明らかにされていない標識と属性を認識する手段となることが出来る。二つの対象が何等かの標識の点で類似していることから、他の標識の点でも両者が類似しているという結論を下す場合の特殊な種類の推論である。つまり個別から個別を導こうとする転導的推理の一種なのである。この方法は可成り有効に思惟を導いてくれるが、その使用に際して注意しなくてはならない点がある。それは

(1) とりあげる類似点は、その事象に対する本質的な意義深い性質についての類似であること。

(2) 推定される性質はその類似点と機能的相関があること。

(3) 類推の結論は論理的に不十分であるから後で事実によって証明されねばならない。

(4) 特に留意しなければならないことは、この方法では、外面的に類似している異なる現象や過程のあいだに存する質的差異をぬぐい去ってしまう危険がある、ということである。

さて、カルノーに戻ってみると、彼は蒸気機関を一種の水車機関と見なした。そして蒸気機関における動力源としての熱と、水車における動力源としての水とを対比させた。こうしておいて、蒸気機関における熱の働きの機構を露呈せしめていたのである。

水それ自身が水車を動かすのではなく、高所から低所に落ちる水のみがそれをなしうる。それと同様に熱も高い状態から低い状態に下るような場合にのみ、仕事をなしうる。処で熱の場合、この水位の高低に対するものは温度である。水位の差、即ち落差がない限り水は運動を始めない。そして熱もまた温度差がない限り移動を始めず、しかも熱の移動なしには蒸気機関、もっと一般には熱機関を運転することは出来ない。

即ち燃焼によって炉中に発生した熱はボイラーの壁を経て蒸気を生ぜしめる。この蒸気はそれ自身と同時に熱をシリンダーに運び、ピストンを押して動かさせて仕事をし、更に復水器（冷却器）に運ぶ。運ばれた熱は復水器の冷水に促えられる。そしてこれを繰り返して蒸気機関は運転される。

かくしてカルノーは言う

「それ故に動力の発生は、蒸気機関にあつては、熱の実際の消費に基づくのではなく、熱い物体から冷たい物体への熱の移動、言いかえれば何等かの原因（燃焼のような化学作用、或いは其の他の作用）によって破壊された熱平衡の回

復に基づいている。……動力を生み出すためには、熱を発生させるだけではない。なお寒をも発生させねばならない。寒なしには熱は利用出来ない。」

更にこの考察は拡大されて、一般化の方向に進められてゆく

「温度差が存するところ、従って熱の平衡の回復が現れるところでは、どこでも同時に動力の発生が起りうる。水蒸気は一つの手段ではあるが、ただ一つの手段ではない。すべての物質は、この目的に利用することが出来る。すべての物質は、寒と熱との交代によって、収縮し、また膨脹する。この体積変化において物質は一定の抵抗を克服し、それによって動力を発生させることが出来る。固体、例えば金属棒は交互に加熱し、また冷却するならば、その長さを増加し、また縮小して、その末端につけた物体を動かすことが出来る。気体は温度の変化によって体積の著しい変化をうける。それがピストンを具えたシリンダーの中に存在するときは、それは非常に大きい運動を惹き起すことが出来る。すべての物質の蒸気は、水蒸気と同じような仕事を行うことが出来る。」

亦衝突や摩擦現象の観察や実験から

「温度の差が存在するところでは、どこでも動力の発生が起り得るが、またそれと逆に、人がそのような力を応用しうるところではどこでも温度の差を発生せしめることが出来る。即ち熱の平衡を破ることが出来る物体の衝突や摩擦は、実際のところ、物体の温度を上昇せしめ、周囲の諸物体の温度よりも高い温度にのぼらしめ従って以前に熱の平衡が存していたところに平衡の破壊を生ぜしめる手段ではないのか」

このような路線の上に立つて、最初の、熱についての科学が樹立されてゆく。

科学の理論樹立の第一歩に於て、先づ出来るだけその対象を単純なものにして考察するのが常道である。

「問題を科学的な方法で取扱う為には、先づこれらの困難を切離して見る必要があります。……（その上で）その

定理を発見し、かつ証明した上で、それを使用し、経験が教える条件つきでそれを応用するのです。そしてこの方法の利益は決して小さなものではありません。」(ガリレオ・ガリレイ、新科学対話・第四日目)

ここでも彼は力学に於ける理想機関からの類推によって熱の理想機関を形成していった。力学における理想的な機械とは摩擦による仕事の損失を考えないでよいようなものである。が、この摩擦による損失に対応するものは、熱機関では何か？ 彼は熱が唯単に一部分から他の部分に移動をして仕事を行わない場合、即ち熱の伝導による仕事の損失がそれに対することであるのを見出した。

そこで完全な熱機関においては、完全な機械の運動が極微小な力や圧の相違によって起されるのと同様に、すべての熱の移動が極微小な温度差により起されるものでなければならぬ。処で一方熱機関によって仕事を爲すためには、有限な、しかも出来る限り大きな温度差を必要とする。これらの条件は一見両立し得ないものの如く見えるが、カルノーは、気体について知られている性質、即ち仕事をしながら膨脹すれば、それ自身冷却し、反対に圧縮する場合には温められる、を用いて熱の伝導によらずして、従って仕事の損失を招かずに温度差を生ずることが出来ることと、温度Aからより高い温度Zに到るためには、AZ間にあって、AとB、BとC……相続く温度差が極微小であるような一連の温度を想定し、これらを経由するようにすることで、有限の温度差を生ぜしめて解決し、ここに理想的な過程をもって進行する熱機関を成立させることが出来た。而もこの過程は同時に可逆的 (Reversible) なものであった。この熱機関での気体の容積変化が極微小の圧の差で行われるように、亦それに伴う熱移動も極微小な温度変化によって起し得ると仮定してあるから、一方向へも、またその逆方向へも全く同様に完全に進行し得るものである。つまりすべての理想的な機関は可逆的でもあるのである。

さて水車や蒸気機関を観察して知られることは、これら永続的に、連続して働き得る器械はすべてその可動部分が

一つの循環的な運動を終えて後全く同一の運動を再び始めから幾度も繰返している。このように一つの物体系の状態が或る変化を完了したとき再び元と全く同じ状態に回帰する過程即ち循環過程 (Cyclic process) はこうした器械の第一の条件である。

カルノーは可逆性とこの循環過程との二つの概念を結合し、理想的熱機関の構造を可逆的循環過程においてとらへ、そして次のようなサイクルを構成した。

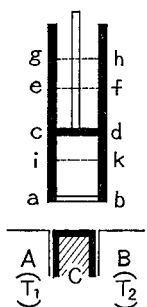


Fig. 1

A は温度  $T_1$  の物体 (高熱源)、熱の不導体 C により A から離されている第二の物体 B は温度  $T_2$  (低熱源) である。シリンダー a b g h は断熱的な側壁と透熱的な底を具えており、その中には気体例えば空気が入っており、可動ピストン c d が具わっている。そして次のような一連の操作を考える。

1. 熱の最良の導体で出来ているシリンダーの底 a b を高熱源 A にのせる。その結果シリンダー内の気体も温度  $T_1$  になる。そしてピストンは最初の位置 i k から e f の位置に押上げられる。気体のこの膨脹にも拘らず、気体は A から受ける熱のため温度  $T_1$  を保持している。(等温膨脹)

2. 次にシリンダーは A から離され、断熱体 C にのせられる。気体は更に g h 迄膨脹する。この際熱は供給されないで温度は降下し、ピストンが g h の位置に来たとき、低熱源 B の温度  $T_2$  になったと考えよう。(断熱膨脹)

3. シリンダーは B の上に置かれる。ピストンは g h から c d 迄下り、気体は圧縮される。気体の温度は常に温度  $T_2$  の B に接触しているため、 $T_2$  の温度に保たれる。(等温圧縮)

4. 次に B からシリンダーは引離され、再び C にのせられる。ピストンは引続き圧縮し c d から i k に至る。熱の供給は断たれているが、気体の温度は上昇し、i k の位置で再び A の温度  $T_1$  になったとする。(断熱圧縮)

これで一循環は完了する。そして再びシリンダーをAに接せしめて、今述べた過程を全く同じ様に何回も反復することが出来る。これが所謂カルノー・サイクルである。こうした全過程は極微少な圧の差、極小な温度差の下で遂行され、従って無限に緩慢に行われるから、 $4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1$ と逆行せしめることが可能である。彼のこのサイクルは勿論、現実には、ただ近似的にしか実現出来ないものである。以上の過程はだから思考実験的なものである。

この完全熱機関の過程に於ては、熱の移動は高温 $T_1$ での熱量 $Q_1$ の吸収と、低温 $T_2$ における熱量 $Q_2$ の放出の処に於てのみ起り、その中間では、前記の仕方では、熱の伝導による損失なしに仕事は外部に成され、再び元の状態に戻っている。従って外部からこの機関が吸収した熱量( $Q_1 - Q_2$ )を仕事Wに変換した事になる。この場合  $W/(Q_1 - Q_2)$  をこの機関の効率というのである。処でこの効率は一見機関の種類によって決まり、全く勝手な値をとることが出来るように考えられやすい。しかし果してそうだろうか？ 亦その値には上限があるかどうか、あるとすればどんな値であるか、

彼は「いかなる熱機関も理想機関の効率より大なる効率をもつことは出来ない。そうして理想機関の効率は熱源の温度にのみ依存し、それを造る作業物質(シリンダー内に入れられる蒸気とか気体等の物質)には無関係である。」ことを示した。

今ここに二つの理想的機関 I・II を考え両者が同一の仕事をするに必要な熱量を夫々  $Q_I$ 、 $Q_{II}$  とする。 $Q_I$ 、 $Q_{II}$  は同値であるかも知れぬし、異なるものであるかも知れない。

先づ異なるものとして  $Q_I \wedge Q_{II}$  と仮定しよう。

I の機関は  $Q_I$  を得て仕事Wを為すよう働かせ、その仕事をもってIIの機関を逆運転し、Wの仕事で  $Q_{II}$  を高い温度  $T_I$  源に放出するようにする。二機関のこのような結合の結果、仕事は完全に消費されるが、熱量はIが  $T_I$  から得たより



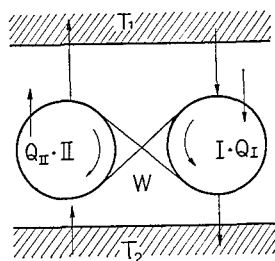


Fig. 2

も多量の  $Q_{II}$  が、その同じ温度において II より放出されることになり、結果としてそれ相応の消費なしに過剰の熱が高温度に持来らせられることになる。そしてこの熱は再び仕事の生産に利用し得るものであるから、この仮定が正しければ自由に多量の仕事を無から創出し得る手段が得られたことになる。これは永久運動不可能なる原理からして勿論不可能である。

故に  $Q_1 \wedge Q_2$  であってはならない。

次に  $Q_1 \vee Q_2$  としても全く同様な結果が得られる。

従って  $Q_1 = Q_2$  の場合が唯一の可能な状態である。

カルノーは言っている。

「人或いはこれに対し批難をさしはさむかも知れない。永久運動が力学的な作用について不可能であることが証明されたとしても、熱や電気的作用を取扱う場合にもそれが真であるとは必ずしも云えないのではないか、と。しかし熱或いは電気の現象に対して、その原因を、物体の或種の運動以外に求めることが果して可能であろうか、そうして、これまた力学の法則に従はなくてよいものであろうか。その人達は、色々な勝手な手段によって永久運動を成立せしめようとした試みがすべて実を結び終ったことを、後天的に知らないものであろうか。真の永久運動機関を製作すること、即ち利用する物体には何らの変化を及ぼすことなく、休みなく継続するところの運動を成立せしめる試みが、未だかつて何人にも成功しなかったことを知らないものであろうか。

「永久運動の普遍的な、哲学的な概念は、最初の衝撃の後は無際限に継続せられる如き運動という表象をその中に含むのみならず、また次の如き表象をも含んでいる。即ち、動く力を無限量創造する能力を有し従って自然における

あらゆる物体を静止の状態から次々に運動の状態に入らしめ、それによって惰性の原理を揚棄することの可能な、それ故にまた、自分自身から力を創造し、終には全宇宙をすべて運動の状態に入らしめ、運動の状態に保ち、更に間断なくそれを促進することも可能な或る種の仕掛けの働きという表象をも含むものである。これこそ眞の動く力の創造というべきであろう。さうして若しもこれが可能なりとすれば、動く力の源を水や空気の流れ、或いは燃料の如きものの中に求めることが全く無駄なことになるであらうし、我々は永劫かれることなき力の泉—さうして欲するがままに汲み取ることの出来る泉—を得たことになるであらう。」

かくして再び永久運動不能の原理は、思いもがけぬ捻りをもたらした。しかしこのカルノーの研究は最初殆んど注目されることがなかった。その発表後八年にして、仏人の技師クラペイロン(Benoit Pierre Émile Clapeyron; 1799-1864)が

「この研究の土台となっている思想、つまり無からは動力をも熱をも創造することは出来ないという仮定を、実のり豊かな異論の余地のないもの」と認め、解析的に、この理論を展開した。そして後日熱と仕事の当量関係が発見されてからカルノー・クラペイロンの研究は、完全にその意義を認められたのである。

この理論は正しい結果を与えていたにも拘らず、この形成に於て、カルノーは以然として熱素説の立場に立ち、熱を物質的本性のものと想定し熱素(Caloric)として扣んでいたし、不滅のものとしていた。類推的方法のもつ限界がここに表われていることには注意しておきたい。現象間にある質的差異が見失われているのである。しかしカルノーは、その遺稿から知られるように其の後、熱の本性についての考察を進めて、ついに熱素説を放棄し運動説にうつるとともに、熱の仕事当量をさえ可成り精密に算出し、エネルギー恒存の思想をいさぐようになった。その遺稿に於て次のようにいつている。

「或る仮説が現象を説明するにもはや十分でないとき、この仮説はすてさられるべきである。熱素を一つの物質、すなわち稀薄な流体とみなす仮説は、まさしくこのようなたぐいの仮説である。この仮説をだめにする経験事実はつぎの通りである。

1. ランフォードの実験。……

2. ……………

(以下省略)

「物体の本質を深く究めることは大変難しい。まちがった推論をしないためには、物体の本性とその形態、或いは力についての我々の知識の源泉をかわるがわる吟味し、基となる概念は何であり、それは如何なる感覚から導かれたものなのかを見極め、人は如何にして、さまざまの抽象の段階をのぼっていくのか、を知らなければならぬ。

熱は分子の振動運動の結果だろうか？ もしそうなら、熱量は振動運動を生ずるのに費された動力の量に外ならない。動力が振動運動を生ずるために費されるのであるかぎり、熱量は不変でなければならない。……………

物体Aから物体Bへ熱を移動させて動力を生みだすとき、Bに到達する熱量は、動力を実現するために使われる物体のいかんを問はず、一定であろうか？ 動力を生みだすために消費される熱を一層多くし、Bに達する熱を出来るだけ少くするような方法があるだろうか？ 更に熱はBには達せず、全部消費されてしまうようにすることは出来るだろうか？ もしこれが可能なら、燃料を使わずに物体の持つ熱を消費するのみで動力を作り出すことが出来るのだが。

「熱は動力、或いは、むしろ形を変えた運動に外ならない。熱は一つの運動である。物体の小部分において動力の消滅が行われれば、必ず同時に、消滅した動力の量に正確に比例する熱量が発生する。逆に熱が消滅するところではどこでも動力が発生する。従って動力の量は自然において変ることがなく、より適切に言えば決して作り出されることも消滅することもない、という命題を樹てることが出来る。実際には、それは形を変える。即ち、それはあるときに

はこの種の運動を、また或時には他の種類の運動を生ずる。しかし決してなくなることはない。

この原理は、いわば力学理論だけから導き出される。実際もし物体がじかに触れ合わず、真の衝撃なしに互いに作用を及ぼし合うならば、活力、或いは同じことだが、動力は決して失われることがない、ということが理論的に示される。……………これまで私が熱理論についてきた考えによれば、単位量の動力を生み出すには、270単位  
の熱を消費することが必要である。「1単位量の動力（1立方米の水を一米高く上げるだけの）は270カロリーだけ熱することに等しい。」

カルノーは、彼の後間もなく、マイヤーとジュールが発見したのと同様の結果を十分気付いていたことが知られる。しかしこの発見も、時を得た発表を欠いたがため、残念ながら既に役には立たなかった。

## 六 熱の仕事当量

活力保存則に於ての困難の一つに次のような場合があった。一つの石を地上に落し、そこに留まらせたとき、その活力即ち運動のエネルギーはどこに保留させられているのであるか。

これに対しライブニッツは運動が物体の微小部分に分けられ、そこで観察不能なものになるのだと仮定したが、これでは何等本質的な解答になっていない。失われた運動エネルギーはどうなるのか？ 亦摩擦についても同様に問題は存していた。ここに注入された仕事は、それだけの効果を外部に表わすことなく、明らかに一部は失われ、活力の消滅がみられる。この際運動エネルギーはどうなったのか？

摩擦によって熱が生ずることは知られていたが、摩擦という力学的現象と熱現象の間の関連を予見する事は当初の物質的熱理論、即ち熱素説では困難であった。両者は全く別個の現象と見られていたのである。熱素説では、摩擦熱

は外から導き来られるとするか、或いは、物体が摩擦のため熱容量を小さくするためであるとしていたが、これらの仮定が根拠のないものであることが、Benjamin Thomson (Sir Rumford) 及び Humphry Davy の適切な実験により指摘された。そして其の後の多くの他の実験からも、熱は発生させられ得るものであり、不可秤量物質・熱素ではない事が明瞭にされた。それに代って登場したのが力学的熱理論即ち熱を運動とみなす理論である。然るときは、運動のエネルギーが熱として現われるという考えに到達し得る。にも拘らず、この考えが全般的に理解され、受け容れられるには長い歳月を要した。

しかし運動が熱に変わるといふ思考方向は、ひとり熱の領域のみならず他の自然現象にも及ぼされ得るものであることが徐々に認められるに到った。

「既知の五十四の化学的元素の他に、物の世界にはもう一つの動因があるばかりである。それは力である。それは、適当な事情の下にあっては、運動・化学的親和力・凝集・電気・光・熱及び磁気となって現われることが出来る。しかしてこの各種の現象の各々から、他のすべての現象がひき起され得る。鉄槌を上げると同一の力は、他に適用されるならば、その他のすべての現象を惹起することが出来る。」(K. Fr. Mohr)

この言葉に見られるように、既に異なる自然力の単一性と相互可変性への認識が現われてきたのである。とはいえ、それらは未だ、単に予想的な域に於てであつた。

エネルギーの原理の成立に、今一步の処まで来ているのを見ることが出来る。これらが正当に評価され、力強く事実として吾々の眼前に押し出されて来る為には、先づ、これら現象相互間の、求められた関係の、精確な数量的表現を得なければならぬ。

これ等への努力と、その第一歩が十九世紀の五十年代に入つて、殆んど同時に異つた方面から、異つた道程を経て

行われた。それは独のマイヤー・(J. Robert von Mayer; 1814-1873) とヘルムホルツ・(H. L. F. von Helmholtz; 1821-1894) 及び英のジュール・(James P. Joule; 1818-1889) の三人によつてであった。

## (一) マイヤーの理論

一八一四年薬剤師の三男としてハイルブロンに生まれたマイヤーは、医学を修了してから、一八三九年東インド商会の東洋航路の船医となつてオランダ貨物船に乗り込んでいた。一八四〇年ジャワへの航行中たまたま熱病患者の船員の瀉血を行った時、次のような事実が彼の注意をひいた。船が熱帯に入つて以来静脈から放出される血液が、動脈を刺したのではないかと思われたほどに、非常な赤味を持っていた。こうした事は、この地の医師には既に十分知られており、事明の事とし特別な注意をひかなかった。しかしマイヤーは

「この現象は私の深甚な注目を惹いた。私は動物の体温は燃焼過程の結果である、というラヴォアジエの説から出發して、毛細管を流れる血液の色が二様に変化することは血液中で行われている酸化の感知し得る記号——可視的な表示——であるとみなしたのである。人体が恒常的な体温を保持するについて、体内で熱が生成されることには、失われる熱と定量的關係——即ち周囲の媒体と關係があるに違いない。そこで熱の發生と酸化過程とはこの二種類の血液の色の相異のように、熱帯においては寒い地帯より概して少いに違いない。」

と推論した。この推論は、それ自体充分満足すべきものであったから、普通の人であればこれで終つたであろうが、彼はここに留らなかつた。この觀察がもとになつて、經驗的にこつこつ築き上げるといふよりもむしろ哲學的天賦を持ったマイヤーの全精神的活動が始められ、自然全体の關連について、もっとも深い認識に到達したのである。前の言に引續いて言う、

「この理論に従つて、この問題に關する生理學的事實を考慮すれば、血液は緩慢な燃焼を行わせる酵素のような液

であると考えなければならない。そして血液の最も重要な機能——即ち燃焼過程の持続は……血液の成分にはよらないで果されているのである。換言すれば、消化された食物の殆んどは物理的結果を生ずる目的で血管腔中で燃焼するのである。

ここからして、有機体における収入と支出、即ちなされた仕事と消耗の間で総収支が償われるべきものならば、……これによって研究対象の見通しをつけることが可能だということが十分に分る。消耗は消費された物質量に存し、（生体内で）なされた仕事は熱の発生である。

「動物の体は、一方では内部で直接に熱を発生して直ちに周囲の物に伝導で伝えるが、他方では運動器官を通じて摩擦とか、または類似の方法で離れた場所においても機械的に熱を発生させる力を持っているから、熱の発生には二通りの結果があることになる。われわれはここで『燃焼作用の説明になるのは直接に生成された熱のみであろうか、または直接生成された熱と計算によるべき間接の熱との和なのであろうか。』ということを知ろうとしているわけである。」

ここに一つの問題が提起された。一部は直接的に、一部は機械的な方法で、有機体を作り出した熱全体は、体内で進行している燃焼作用と量的に対応するかどうか？ 当量であるかどうかである。もし対応しないものとするならば、熱が、同様に仕事も、無から生成したことになり、有機体によって媒介された永久機関が成立することになる。

「生きている有機体はそのすべての謎や驚異を考に入れても、無から熱を発生させることは出来ない。」

生体に対しても亦永久機関不可能を主張しようとすれば、かの仕事及び熱の出所を探求しなければならない。

「生理学的燃焼理論は、与えられた物質の燃焼に起因する熱量は不変である——即ちその総量は燃焼に伴う環境に影響されない——という命題から出発する。……」

この生理学上の原理を堅持するならば、上述の疑問に關する解答はすでにして与えられていることになる。何故なら、もし吾々が有機体に対して今否定したばかりの熱創造力を附与しない限り、有機体が発生する熱はそこに生起する化学反応以上になり得るとは仮定出来ないからである。そこで燃焼理論に關しては何等の異論もなく、理論そのものを犠牲にするような省略もせずに有機体によって直接に生成される熱と、力学的作用によって間接に生成される一部の熱との総量は燃焼の総量と定量的に対応する、即ち等しいということを確認することになる。

ここから不可避的に、有機体が機械的に発生させた熱は発生のために消費された仕事と不変の定量的關係を有していなければならない、ということになる。……………

熱と仕事との間にある不変の量的關係は生理学的燃焼理論の根底である。」

かくしてマイヤーは、生理学的燃焼理論から、熱と仕事との間の不変の量的關係を推測するにいたつたのである。

「運動と熱との間にある物理的關係に注目することは私にとって結局必要だったのであって、そして熱の仕事当量に氣附かざるを得なかつたのである。」

こうして始められた彼の理論は一八四二年五月、「無生物界の力について」(Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur)なる標題の下に發表された。この中で彼は言う。原因なくして結果が生ずることは全然あり得ない。又逆に原因が結果を生ぜずにいることもあり得ない。すべての原因は一定の、正にそれに相応した——それより大きくも小さくもない——結果を有する。原因の中には、だから結果を規定するすべてのものが含まれており、之は例え形式が変わつたにしても結果の中に於て完全に見出されるのである。原因と結果とは従つて一定の意味に於て互に相等しい。“Causa aequat effectum”(原因結果同一の原理・ライブニッツの言葉)からマイヤーは、原因を、量的には不滅な、質的には可變的な事象と名づけている。そうしてあらゆる原因を二つに区分する。その一つは、可秤



量性及び不可侵入性なる性質を有する原因、即ち物質と、その二は、不可破壊的、可變的、不可秤量的対象である力。両者の各々は不滅であり、それら二つの原因相互間には遷移は起らない。然しながら物質も力もそれ自身に於ては種々の方法によつて形を変え得る。物質には然しながら多くの異なる種類即ち相互に変化を許さざる化学的元素があるに對し、力には一つの種類があるだけである。何故なら、すべての力は相互に変化することを得、すべての力は同一なる事象、同一なる原因の、異なる現象形式であり得るから。例えば「重量を上げる原因は力である。従つてその結果である持上げられた重量も一つの力である。即ち、もっと一般的な形式でこの關係を表わせば、重さのある対象の空間的な差異は力である。この力は物体の落下をひき起すから落下力と呼んでいる。落下力と落下、もっと一般的にいつて落下力と運動とは原因結果の關係を有し、一方から他に変換し得る力であり、全然同一の対象を示す二つの異つた発現形態である。」「運動が他の運動を生じたり重量を持上げることなく休止する場合を無数に知っているが、一度存在した力は消失するものでなく、唯その形を変え得るのみである。……例えば二個の金屬板を摩擦すると、運動が消失し、その反對に熱が出現することを見る。そこで運動は熱の原因であるのかという疑問が生ずる。この關係を確めるためには、運動を消費して熱が現はれる如き無数の場合に、運動が熱の生成以外の結果を持たないか、熱が運動以外の原因をもたないか、という疑問を明らかにせねばならぬ。……………」

運動と熱との間の因果關係を認知することなくしては、消滅した運動について何らの説明をなし得ないのと同様それなくしては摩擦熱の生成に何ら説明を与へ得ない。」

「若し多くの場合、消滅した運動に對して熱以外の他の結果が見出されず、生じた熱に對して運動以外の他の原因が見出されないことが決着されたのであれば、吾々は結果なき原因及び原因なき結果という仮定を捨てて、熱が運動から生ずるといふ假定を選びたい。……………」

熱となり得るためには、運動は、運動たることを止めねばならないと推論したのである。」

生体の観察から出発した彼の思想は、かくの如くして、一般の場合に拡張された理論としての形を持つに到った。

「しかしながら吾々はこれを以て満足する事は出来ないし、また満足してはならない。吾々は与えられた量の熱を発生させるには幾何の機械的な力を必要とするか、またその逆はどうであろうか、ということを知ることを欲する。換言すれば、運動と熱との間にある不変の量的關係を示す法則は数量的に表現されなければならない。」

現象を正しく表示する理論は、その当然の結果としてその現象間の關係を数量的に表現出来るものでなければならぬし、亦そのような能力を持つにいたるまで、充分な検討努力がされなければならない。これは彼の大きな信念であつた。

「自然に関する知識の基礎を最も短期間に建設するために従うべき原則は数語に要約することが出来る。吾々が直接触れることが出来、しかもごく頻繁に生ずる自然現象は、感覺器官による周到な検討を経なければならず、この検討はその結果が数字による表現を許す定量的決定として得られるまで継続しなければならない。この数字は正確な自然研究に要求される基礎である。」

當時の物理学的研究は、すでにマイヤー自身が実験をしないでも、既存のデータから、熱と運動との間の当量關係を算出出来る点に達していた。

マイヤーの計算と、その考えを追ってみよう。彼がその演繹の土台として選んだものは、次の二つの気体の熱効果に関して発見された事実である。その一つは Gay-Lussac の気体噴出実験である。図のような容器 A に気体を満し、B は真空にしておき、コック C を開いて二つの容器を連絡し、気体を膨脹させる。ゲイ・リュサックはこのとき起るであろう冷却を見ようとしたが、全体として温度変化が全然起らないのを知って驚いた。

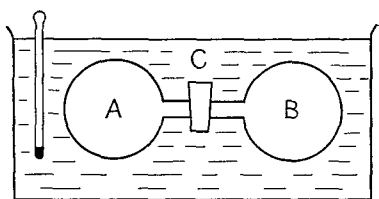


Fig. 3

この実験をマイヤーは正しく解釈し、この事実は気体は圧力に抗して膨脹するとき、換言すれば仕事をするときだけ熱の降下を受けることを証明していると考えた。

第二の事実は、気体の定圧比熱  $C_p$  と定積比熱  $C_v$  に於て  $C_p/C_v > 1$  である、という事である。即ち気体を一定温度に熱しようとするとき、その圧力を一定に保つように（この場合気体の体積は膨脹する）して行かう場合には、その体積を変えないようにして行かう場合より多くの熱を必要とする。この両者をマイヤーは結びつけて次のような推測をした。定圧の場合気体は外部に仕事をしながら膨脹するからその分だけ熱の降下を生ずる。故に定積の場合より余計に熱を必要とする。そして余計に吸収した熱量がこの気体にあの膨脹という仕事を行わせたのだ。そこでこの両者の関係から、求めているものが即ち熱の仕事当量が得られる筈だ。

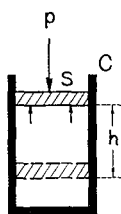


Fig. 4

図に於て、シリンダー C 内に一定量（質量  $M$ ）の気体（例えば空気）を入れ、これを一定の体積に保ちながら温度  $T_0$  から  $T_1$  に熱する。これに必要な熱量  $H_1$  は、この気体の定積比熱（単位質量の気体を定積で、単位温度上昇するに必要な熱量）を  $C_v$  とすると

$$H_1 = MC_v(T_1 - T_0)$$

次に、一定の圧力下で  $T_0$  から  $T_1$  に熱する為の熱量  $H_2$  は、定圧比熱（単位質量の気体を定圧で単位温度上昇するに必要な熱量）を  $C_p$  とすれば

$$H_2 = MC_p(T_1 - T_0)$$

定圧状態を保つために気体は膨脹しピストンは 1 から 2 まで  $h$  の高さ上昇する。この膨脹は大気の圧力の強さを  $P$

(単位面積当りの圧力)とし、ピストンの面積を $S$ とすると、 $pS$ なる力に抗して行われているから、気体が外部に行った仕事 $W$ は

$$W = pSh = p(V_2 - V_1)$$

シリンダーの初めの体積 $V_1$ 膨脹後の体積 $V_2$ である。亦この気体の膨脹係数を $\beta$ とすれば

$$V_2 - V_1 = V_0(T_2 - T_1)\beta \quad V_0: 0^\circ\text{Cに於ける体積}$$

$$\therefore W = pV_0\beta(T_2 - T_1)$$

そこでこの「熱の消費」と「機械的な結果」との間に成立すべき一定の関係、即ち熱の仕事当量を $J$ とすれば

$$J = \frac{W}{H_2 - H_1} = \frac{pV_0\beta(T_2 - T_1)}{M(C_p - C_v)(T_2 - T_1)} = \frac{pV_0\beta}{M(C_p - C_v)}$$

$$\therefore J = \frac{p\beta}{\rho(C_p - C_v)} \quad \rho = \frac{M}{V_0}: \text{気体の密度}$$

今日使用されている数値を用いて $J$ の値を求めてみよう。気体として空気を採ることにする。

$$\rho = 1.293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3, \quad p = 1.013 \times 10^6 \text{ dyn/cm}^2 = 76 \times 13.593 \text{ g/cm}^2,$$

$$\beta = \frac{1}{273}, \quad C_p/C_v = 1.403, \quad C_v = 0.17, \quad C_p = 0.24$$

$$\therefore J = 418 \text{ kgm.}$$

マイヤーが得た値は三六五キログラム・メートルで、この値とは違っていたが、それは $C_p$ などの測定値が違っていたからである。彼は言う

「与えられた量の水を0度から1度まで温めることは、これと等しい重量が三六五メートルの高さから落下するこ

とに相当する。この数が熱の仕事当量である。」

熱の仕事当量が確立された以上、これ以後熱は力学的の力を計るのと同一の尺度を以て計り得ることとなった。

マイヤーは、上述の理論を、はっきりと無生界に局限して述べている。彼も先づ、最も単純な関係から説明して行うとしたためである。しかし其の後に於て、彼はその理論を自然科学の他の分野にも拡張、熱、磁気、電気、およびそれ以外の不可秤量物質から物質性を剝奪した。そして

「自然の中には、一定量の非物質的な状態がある。この状態は、観察された対象の間に存在する変化にもかかわらず、その値を保持するが、その現象型は非常にさまざまに変化する。」

とも、或いは

「実際にはたった一つの力しかない。力は無機界、ならびに有機界を永遠に変化して循環する。」

とも言っている。彼は、自己の思想が広大なる包括性を有することを、彼自身既に明瞭に会得していたということを知るのである。処で彼が用いている力なる語はライブニッツの『活力』の意に於てであった。だからここに示されている原理を現在の言い方でいえば、「宇宙のエネルギーは一定不変である」ということになる。

#### (4) 熱の仕事当量を精密に測定する実験

マイヤーと独立に、彼よりは多少遅れて同一の発見を、異った形式で、異った基礎附で到達したのは、英の大麦酒醸造家のジュールであった。彼はアマチュアの科学愛好者でありアマチュアの研究者と称さるべき人であった。彼にしてもマイヤーにしても、本来の哲学者、物理学者ではなく、応用科学者・医師・技術家であり、このような人々によつてこの原理の主役が演じられたということは大変興味あることである。

従来 of 学者達が既成の概念にとらわれ、その堅い殻に閉ぢこもっている間に、自由な立場にあるこれらの人々によ

り、どしどし新概念が作られたと見る事も出来る。亦科学や技術が経済状態の改善に大きな力を有することが、一般にも強く滲透した結果、一般に興味を持たれた為とも言えよう。

ジュールは、初め電流によって得られる磁気力を実用化して、廉価な動力を得ようとの着想から、電磁気学を熱心に研究したが、中でも特に興味をそそったものは電池につけた針金が熱を発生することであった。そしてその発熱が抵抗と電流の強さの二乗に比例する（ジュールの法則）ことを発見したが、それよりも、この熱発生が電池内の化学薬品の消費と一定の簡単な関係にある事の発見が非常な関心を持たせた。更に、電流により機械を動かす場合、電流が同一の状態にある限り、機械が働いて居る時の方が、静止して居る時より、針金に発生する熱が少ないことが明らかにされた。力学的な仕事の源が化学的な過程の中に求められること、そして化学的な過程は、その時の事情によって、或る時は熱のみを与え、亦或る時は仕事とそれに応じて少なくなった熱の両方を与えるのだという推測に到った。

この思想が動機となつて、機械的な仕事と熱との間の関係の研究に入つていった。先の電流の熱作用現象の中から、複雑な介在物である電池を取り除いて、直接にしかも簡単に現象を露出させるために、電池からの電流の代りに、磁石電流即ち磁石の運動に依つて生産される電流を用いた。この場合、この電流により発生した熱は、磁石の運動のために消費された力学的仕事に由来する。この事を証明する目的で、水を充たし、水平に置かれたガラス管の中に感應コイルを入れ、これを落下重量によって、二箇の強力な磁極の間に立てられた垂直軸のまわりに廻転させる。ここに発電された感應電流によって、コイル中に生産された熱を、重量によってなされた力学的仕事と比較した。実験の結果、一ポンドの水の温度を $1^{\circ}\text{F}$ 上昇せしめる熱量は、八三八ポンドの重量を一フィート、或いは一ポンドを八三八フィート持ち上げる力学的な力に相当することを得た。

そしてマイヤーと同様に、自然の原動力は不変である。力が消費される場合はいつでもこの消費に相当した量の熱

る。

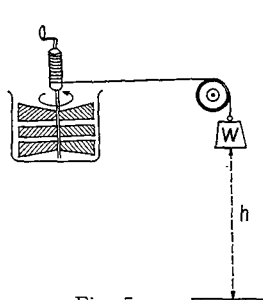


Fig. 5

が成立する。力と熱が等価であるという考えが正当なものであれば、或る定った仕事の量からは常に同一の熱が——その方法には無関係に——得られるべきである、との主張を持つに到り、「熱と力学的な力を絶対数で結びつける」のを自己の使命として、精力的な実験を開始したのである。

処でこの目的を果す為の実験は、次の二つに分けられる。第一は、この数値を出来る限り正確に求める事、第二には、熱の仕事当量の存在を証明する事。

第一の実験の為に、先づ両者の関係をもっと直接的に、より単純化した型で示す実験を求めなければならぬ。仕事と熱との間の最も簡単な関係、それは摩擦によって仕事が生じ、熱に変換される場合である。

そこで液体を摩擦するために水車を利用した。水車が水槽中で、落下重量に依て廻転され、その摩擦によって水の温度上昇を起させる。

重量  $W$  の錘りを距り  $h$  だけ落下させたときの力学的仕事は  $Wh$  である。この仕事によって水温が  $T_1$  から  $T_2$  になったとすれば、生じた熱量は、固体部全体の水当量（金属製の水車も水と同様に温度が昇るから、 $\frac{1}{2} \times \text{錘りの当量} + (\text{鉛板の当量}) \times (H/\text{比熱})$ ）が温度  $1^\circ$  上昇せしめるに必要な熱量である。これを水当量という）を  $m$  とすると、 $m(T_2 - T_1)$  であるから

$$J = Wh/m(T_2 - T_1)$$

によって、一単位量の熱がどれだけの仕事に当るか、即ち熱の仕事当量が求められる。

彼はこの実験を繰り返し繰り返し驚くほどの回数行った。或る時は、錘りの重量を変え、亦落下距りを、そして液

体の種類を、そして装置を改良したり、この実験に際して生ずる音による損失等を補正したりして、多数の数値を得た。それらの数値を少し列挙してみよう。

890  $\frac{1}{16}$  Lb (488  $\text{kgm}$ ), 774 (425), 770 (422), 781.5 (428), 782.1 (429), 787.6 (432), 772 (423), 772.629 (423), 772.814 (424), 775.352 (425), 776.045 (425), 773.930 (424)

亦彼は第二の実験のために全く異なる方法を使用して実験した。熱と仕事との間の比例数の不変性を多種多様の変化過程に於て示すことは、正に力学的熱当量の存在を証明することになる。例えば、容器内の空気をポンプで圧縮した時の温度の上昇と、その時の力学的仕事から 795  $\frac{1}{16}$  Lb (436  $\text{kgm}$ ) を、二二気圧に圧縮した空気を自由拡散させるときの温度降下から 820 (449), 814 (446), 760 (416) 等の値を得た。これらの値は十分に一致的であった。こうした実験を一八七八年まで続けた。

「私がこの実験を繰り返しても、決して時間の浪費にはならないであろう。というのは、強力な自然力は造物主の生成！ によって破壊できないし、また力学的な力が消費されている場合はつねに、厳密な当量が熱で得られる、と私は確信しているからである。」

彼が得た結果は前記のように、或る値のまわりに比較的集っていたとはいえ、まだ可成りのかけ離れを示している。しかし彼は非常な大胆さで、この実験からあの遠大な結論を抜き出したのである。彼のこの勇敢さは、決して無謀であることによるのではなく、自己の考えの正当なることに對する強い確信によるものであったといえる。

マイヤーのあの主張もそうであったが、ジュールの主張も、初めは特別な成果を取めなかった。それどころか、多くの物理学者は否定的な態度をとった。その主な理由を我々は、当時の自然科学界に支配していた風潮に求める事が出来る。論拠薄弱なる思弁を惧れる余り、何等かの点に於て自然哲学の如く見えるものはすべて、例え向上的な考察



を有するものでも、過度な熱心と近視眼的な観方で加重された畏怖心から受け入れようとはしなかったのである。

しかしながら、力の恒存の原理を適用し、間断なく繰り返される変化に富んだジュールの実験は、漸次専門家達の注意をひき、信じられていった。そしてエネルギー恒存の概念も亦除々に自然科学の他の部門に導き入れられることになった。

## 七 エネルギーの原理の確立

エネルギーの恒存を自然界の一大原理として初めて言い表はしたのはマイヤーであり、力学的な仕事から熱への転化及熱から仕事への転化を言い、熱の仕事当量を精密に測定したのはジュールであった。

しかしエネルギー恒存法則の導入並びに完成に際して本質的な役割を果たしたのはヘルムホルツであった。ヘルムホルツはジュールの研究のことは知っていたが、一八四二年のマイヤーの論文のことは知らず、全く独立に（後にマイヤーの研究を知り自分の根本の考えは、マイヤーと同一であったこと及びマイヤーが第一の発見者であることを認めている。）永久機関不能の原理に導かれて、同一の考えに到達しエネルギーの恒存ということを大きな原則として述べ、これの一大普遍化という、雄大な構想力を必要とする仕事を行ったのである。

エネルギー恒存則の確立には、マイヤー、ジュール、ヘルムホルツの三人が最も直接的に寄与しているが、ジュールは前述のように熱の仕事当量の精密測定を専ら行い、仕事と熱の相互転換を言っているものの、エネルギーの恒存ということを大きな原則として述べることはしなかった。亦ヘルムホルツの考えがマイヤーのものと同じであったとはいえ、その問題の取扱いは、数学的であり、具体的に厳密詳細であった点に於てはるかに勝っていた。もとよりマイヤーの非凡な着想とその功績は人々の十分に認めるところであるが、エネルギーの法則が確立されたのは、ヘル

ムホルツの一八四七年の論文「力の恒存について」(Ueber die Erhaltung der kraft.) によつてであつた。

ヘルムホルツは一八二一年、ポツダムに生れ、ギムナジウムの教師であつた父の言によつて医学を修め外科医となつた。軍医として勤務中の一八四五年頃に行つた動物体内の熱発生についての研究から、マイヤーと同じように力の恒存ということを考え始め自己の結論に到達したのである。

彼のこのような方向への努力は

「物理的科学の問題は、自然の箇々の現象を一般的規則に帰着させて、更にこれから規定し得るような法則を探求することである。」に導かれてであつた。この目的の為に科学には実験的な仕事と理論的な仕事とがある。現象の部分的法則性を探し求めることは、科学の実験的部分の仕事であり、これによつて求められた法則は、それに属する現象をすべて包括する一般的類概念として現われるのではない。

「これに反して理論的部分は現象の未知の原因をその目に見える作用から探すのであり、これを因果の法則に依つて捕捉しようとする。吾々は自然のあらゆる変化は十分な原因を持たねばならぬという根本法則に依つて此の仕事をを行うことを求められ且つこれを能くし得るのである。吾々が自然現象に基礎を置くところの直接の原因は全く不変的でもあり得るし、また可變的でもあり得る。後の場合には此の根本法則に従つて更に此の變化の他の原因を探すことが必要であり、以下かくの如くして、しまいには最後の原因、すなわち不変の法則に従つて働ものであり、従つて何時でも同一の外部の状況の下では同一の作用を生ずる原因にまで到達せねばならぬ。

理論的自然科学の最後の目的は自然に於ける現象の最終の、不変の原因を見付けることである。……………

自然の捕捉を目的とする科学はそれが捕捉し得るという仮定から出発せねばならず、恐らく矛盾することのない事實に依つて其の限界に追つめられるまで此の仮定に従つて結論し研究すべきは明かである。」

との強固な科学観の下に行われたのである。

彼の理論の根柢は

「自然の物体の如何なる組合せを以てしても動力を連続的に無から創造することは出来ないという假定から出発する。」

そしてその目的は

「全く同様の方法で今述べた原理を物理学のあらゆる部門に及ぼし、一つには現象の法則が既に十分に研究されている場合に対してこれを応用し得ることを示し、また一つには此の助けをかり、既知の場合に対する豊富な類推にたすけられて、これまで十分には研究されていない法則を推論し、それに依つて実験に対して導きを与えようとするにある。」

先づ永久機関不可能の原理が次のようにより厳密に一般的に取扱はれてくる。

互いに或る空間的關係にある自然の物体系が、それらの相互作用力をうけて、或る他の位置に來ると、このために一定の仕事がなされる。さて此の仕事をもう一度得るために此の力を再び働くようにしようと思えば、何等かの方法で、物体を最初の条件に戻さなければならぬ。それには或る仕事の量を再び使はなければならぬ。処で吾々の仮定は、此の系の物体が最初の位置から第二の位置に移るとき得られ、第二の位置から初めの位置に移るとき失われる仕事の大きさが、その移行の仕方、道筋、速度が何であらうと常に同一であることを要求する。何となればいづれかの道筋に於ける仕事が他の道筋に於けるものよりも大きいとすれば、最初のを仕事を得るために利用し、引戻すのには他の道筋を利用すればよい。此のようにして無限に力学的な力を得ることが出来ここに永久機関が成立することになる。

数学的表現にすれば、この原理は活力恒存の原理になる。最も簡単な場合として、高さ  $h$  に持ち上げられた質量  $m$  の物体から取り出す事の出来る或いは消費される仕事について行ってみよう。

この仕事の大きさは  $mgh$  である。ここで  $g$  は重力の加速度である。

鉛直に自由に高さ  $h$  まで上るためには、この物体は  $v = \sqrt{2gh}$  の速度を要する。そして落下して来たとき再びこの大きさに達する。故に  $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$  となり、活力恒存の原理が導かれる。亦このことから次の事実が分る。力で「物質  $m$  の活力の量」として知られている  $mv^2$  の半分は仕事の大きさの尺度の代りに用いる事が出来る。

ヘルムホルツは

「力の大きさを測るのに今日普通に用いられている方法と一層よい一致を得るために私は  $\frac{1}{2}mv^2$  を以て活力の大きさを現わすものと定め、このようにすることによってこれは仕事の大きさと全く等しくなる。」と言っている。

処で活力恒存の原理はあらゆる種類の力に適用出来るものではなく、力が結合線の方に向き大きさが距りにのみ関係する所謂中心力の場合にのみ適用されることを導出し証明している。

活力の原理を力の恒存の原理たらしめんとしてヘルムホルツが企てた変形は次の如くであった。

活力  $K$  の作用によってなされた仕事  $W$  に対する関係を表わす方程式は活力の原理から、 $K + W = \text{Const.}$  である。この式での仕事の概念  $W$  の代りに、仕事量  $W$  に等しく、それに対する張力の量  $U$  の概念を導入入れた。従って張力は仕事と同様ただ系の瞬間々の状態、位置関係にのみ関係している。そこで先の方程式は  $K + U = \text{Const.}$  となり、この和を簡単にこの系に内在する力とすれば、それを以て力の恒存の原理が得られることになる。

この転換は、一見つまらない些細な事の如く見えるが、これに依て物理学のあらゆる領域にこの原理が開かれる事になったのである。

マイヤーは、運動・重力・熱・電気等々の如く数々の質的に異なる力の諸形式を認めているに對し、ヘルムホルツの見解では、すべての異なる現象形式が活力と張力との二つの概念の下に包括されており、すべての自然現象の解釈の單純化に於て遙かに一歩を進めたものと言えるのである。

この原理を物体の体系の中で行はれる任意の變化過程に適用しようとするれば、唯單に或る時点におけるすべての異なる種類の張力と活力を總括して合計すればよい。この合計高は体系に内在する全体の力を表し、外部よりの影響がない限り不変である。

ここでの問題は、すべての個々の力量を同一の尺度で計らねばならないことである。処で物理学に於ては、運動量、熱量、電磁氣量……皆異なる伝統的な單位量、即ち尺度を用いている。故に合計前にこれらの各種の力を共通の力学的尺度に還元すること、これ等の力学的當量を確定することが必要になる。

何をもつて共通の尺度にするかに、以前から意見の相違があり、この原理そのものにはなくここにその適用を妨げる困難があつた事は前に述べた如くである。しかし、あらゆる場合に通用する當量は存しないから、各種の力に對して特にそれに相當した當量の値を求め試すことが必要になる。

このような考えからヘルムホルツは更に一つ一つの異つた物理的現象を力の恒存の原理と關係させて研究してゐた。

その結果は、万有引力の下に起る運動・摩擦等の伴はない完全な固体・液体の運動・完全弾性体の運動・吸収による運動の消失の起らない音・光輻射熱等の諸現象は皆この原理にあてはまつた。そしてこれ以外の他の場合、非弾性体の衝突や摩擦による活力の損失のある時には、何等かの他の力の形式が要求される。彼はこの要求を、摩擦或いは衝突する物体の分子的構成における内部張力の増加・音・電気そして就中熱の發生としてとらえた。そして力の恒存

の原理に従って、力学的力のすべての損失に対し必ず消費された仕事と等しい一定量の熱が発生しなくてはならないと論じた。化学変化による熱発生も一定量の化学的引力によって起される活力量であり、この原理の帰結であった。次に新分野としての電磁気学への適用を行った。この部分は困難であったが、これらの分野で観察される現象は、その当時までの測定実験の教えるかぎりでは、この原理に矛盾しないということを確証することが出来た。

このような彼の仕事は吾々を根本的に重要な考察に迄導くものであった。彼はこの論文の最後に於て言っている。「私は以上に述べたところに依って既述の法則はこれまでに知られている自然科学の事実の何れにも矛盾するものでなく、それどころか夫等の多くに依って驚くほど確かめられることを証明したと信ずる。私は結論を出来るだけ完全に、此れと自然現象の既知の法則との間の結合が実際に起り、それが実験に依って確かめられることを待つべきかを述べるよう努力した。此の研究はその仮説的部分のために私に提出の理由を与えることもあろうが、その目的は物理学者に対して此の法則の理論的・実践的・ならびに方便の重要性を出来るだけ完全に示すことであつた、それを完全に確めることは物理学の近い将来の主なる問題の一つと見なさるべきであらう。」と。

この原理の厳密な演繹的証明は、この原理が正に一般的なる事の故に全然なし得ないことである。しかし、お互に連絡がなく、それぞれ異つた立場から出発した多数の研究者が最後に皆一様にこの新しい理論に到達したことはこの理論がこの上なく真実であることを立証しているといえよう。

(一九六〇・一一・二八)

引用文献・参考書は紙数の都合上いちいち掲げられなかったので、ここに一括して附記して置く事にする。

一、オストヴルト エネルギ― 岩波文庫

一、マイヤー・ヘルムホルツ・フアラデー エネルギ―理論の成立 創元科学叢書

- 一、ヘルムホルツ 力の恒存について 岩波文庫
- 一、マックス・プランク エネルギー恒存の原理 世界大思想全集
- 一、ダンネマン 自然科学史、五・六・八巻 三省堂
- 一、The Secon Law of Thermodynamics, 1899  
(Memoirs By Carnot, Clausius And Thomson) By W. F. MAGIE, PHD.  
Reflections on the Motive Power of Heat. By Sadi Carnot.
- 一、Thermodynamik. von Prof. Dr. W. Voigt. 1903. 1. Band.
- 一、マッハ 力学の発達 内田老鶴圃
- 一、カジヨリ 物理学史講義 中文館
- 一、ヴェ・ダニレフスキー 近代技術史 岩波書店
- 一、A History of Science, Technology And Philosophy in the Eighteen the Century. by. A. Wolf.
- 一、Christian Huygens. by. A. E. Bell.
- 一、アッシャー 機械発明史 岩波書店
- 一、ホグベン 市民の科学(4巻) 日本評論社
- 一、物現学史研究(一九五八) 2 カルノーのノート 広重徹訳